

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕГРЕВА АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ ЛИТЬЯ–ПРЕССОВАНИЯ

© 2019 г. А.П. Скуратов, А.С. Потапенко, Ю.В. Горохов, Н.П. Попиякова

Сибирский федеральный университет (СФУ), Красноярск

Статья поступила в редакцию 25.06.18 г., доработана 30.09.18 г., подписана в печать 02.10.18 г.

Приведены результаты численного исследования температурно-временных зависимостей при непрерывном совмещенном процессе литья и прессования опытного алюминиевого сплава АК12, имеющего различную температуру перегрева, в интервале времени от пуска до момента выхода установки на стационарный тепловой режим. Расчеты выполнены на основе трехмерной компьютерной модели сложного теплообмена в установке новой конструкции, оснащенной горизонтальным карусельным кристаллизатором. Проведены теоретические исследования воздействия перегрева заливаемого алюминиевого расплава на процессы нестационарного теплообмена. Определено влияние характера теплообмена в переходном тепловом режиме на температурное поле затвердевающего расплава на различном его удалении от места заливки. Показано, что по мере разогрева кристаллизатора в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля в контрольном сечении металла вблизи инструмента прессования со сдвигом области с максимальной температурой к контактирующей поверхности кристаллизатора. Установлено, что продолжительность переходного процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею стационарного теплового режима зависит от температуры заливаемого расплава. Определен максимальный предел величины перегрева заливаемого металла, выше которого при реализации технологии непрерывного совмещенного процесса литья–прессования алюминиевый расплав не затвердевает в кристаллизаторе, и требуется организация принудительного охлаждения элементов установки. Проведена оценка влияния перегрева расплава на характер температурного поля по сечению кристаллизатора во всем периоде переходного теплового процесса. Предложены конструктивные мероприятия, обеспечивающие в ходе эксплуатации установки рациональные температурные условия работы подшипников.

Ключевые слова: непрерывное совмещенное литье и прессование, компьютерная модель, теплообмен, переходный режим, алюминиевый сплав АК12, затвердевание, перегрев расплава, горизонтальный карусельный кристаллизатор.

Скуратов А.П. — докт. техн. наук, профессор, кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет (СФУ) (660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26а).
E-mail: a.skuratov@mail.ru.

Потапенко А.С. — аспирант, кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, Политехнический институт, СФУ.
E-mail: komvzvodt-81@mail.ru.

Горохов Ю.В. — докт. техн. наук, профессор, кафедра обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). E-mail: 160949@list.ru.

Попиякова Н.П. — аспирант, кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, Политехнический институт, СФУ.
E-mail: natasha.popiyakova@mail.ru.

Для цитирования: Скуратов А.П., Потапенко А.С., Горохов Ю.В., Попиякова Н.П. Расчетное исследование влияния перегрева алюминиевого расплава на теплообмен при непрерывном совмещенном процессе литья–прессования. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 2. С. 26–34. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-26-34.

Skuratov A.P., Potapenko A.S., Gorokhov Yu.V., Popiyakova N.P.

Numerical investigation of influence of molten aluminum overheating on heat transfer in continuous combined casting and pressing

The article presents the results of a numerical study of temperature-time dependences in continuous combined casting and pressing of the AK12 experimental aluminum alloy, which has a different overheating temperature, in the time interval from start-up to the moment of the unit reaching the stationary thermal regime. Calculations are carried out on the basis of a three-dimensional computer model of complex heat transfer in the unit of a new design equipped with a horizontal carousel crystallizer. Theoretical studies are conducted to determine the influence of superheating of poured aluminum melt on the processes of unsteady heat transfer. The influence of the nature of heat transfer in the transient thermal regime on the temperature field of the solidifying melt at different distances from the pour point is determined. It is shown that as the crystallizer heats up in the transition process, the asymmetry of the temperature field in the control section of metal increases near the pressing tool with the shift of the maximum temperature region to the crystallizer contact

surface. It is found that the transition process duration when starting the unit in a cold state until it reaches a stationary thermal regime depends on the temperature of poured melt. The maximum limit of the overheating value is determined, above which poured metal, when implementing the technology of continuous combined casting and pressing, aluminum melt does not solidify in the crystallizer and forced cooling of unit elements must be arranged. The influence of melt overheating on the pattern of the temperature field along the crystallizer cross section over the entire period of the transient thermal process is estimated. Design measures to ensure rational temperature conditions of bearings during the unit operation are determined.

Keywords: continuous combined casting and pressing, computer model, heat transfer, transient mode, AK12 aluminum alloy, solidification, melt overheating, horizontal carousel crystallizer.

Skuratov A.P. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of heat engineering and hydro-gas dynamics, Polytechnic Institute, Siberian Federal University (SibFU), (660074, Russia, Krasnoyarsk, Kirenskogo str., 26a). E-mail: a.skuratov@mail.ru.

Potapenko A.S. — Graduate student, Department of heat engineering and hydro-gas dynamics, Polytechnic Institute, SibFU. E-mail: komvzvodt-81@mail.ru.

Gorokhov Yu.V. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of metal forming, Non-Ferrous Metals and Material Science Institute, SibFU (660025, Krasnoyarsk, pr-t Krasnoyarskij rabochij, 95). E-mail: 160949@list.ru.

Popiyakova N.P. — Graduate student, Department of heat engineering and hydro-gas dynamics, Polytechnic Institute, SibFU. E-mail: natasha.popiyakova@mail.ru.

Citation: Skuratov A.P., Potapenko A.S., Gorokhov Yu.V., Popiyakova N.P. Numerical investigation of influence of molten aluminum overheating on heat transfer in continuous combined casting and pressing. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 2. P. 26–34 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-2-26-34.

Введение

Установки, реализующие энерго- и ресурсосберегающую технологию совмещения операций непрерывного литья и обработки давлением, имеют разнообразные конструкции, основным элементом которых является кристаллизатор. Первый агрегат, совмещающий в себе непрерывный процесс литья и прессования по способу Conform, предложенный Д. Грином [1] и запатентованный «United Kingdom Atomic Energy Authority» (GB) в 1971 г., был разработан с использованием машины Conform, оснащенной элементами роторного кристаллизатора [2].

В процессе эксплуатации установок Conform были выявлены некоторые недостатки, нарушающие технологический процесс и связанные со сложностью фиксации прессового инструмента, а также невозможностью надежно контролировать величину зазора между кольцевой вставкой башмака и дном ручья колеса [3, 4]. Кроме того, опыт эксплуатации установок этой конструкции показал, что одна из основных причин их нестабильной работы при подаче расплава заключается в возникновении при затвердевании жидкой фазы неуправляемого процесса ее «намораживания» на входной части инструмента прессования [5, 6].

Одной из новых конструкций, разработанной отечественными учеными и имеющей ряд технологических преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами, является установка непрерывного совмещенного литья и прессования

цветных металлов с горизонтальным карусельным кристаллизатором [7]. Однако на сегодняшний день еще не создано промышленных образцов установки такого типа, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции [8]. Это связано с практическим отсутствием научно обоснованной теоретической базы для проектирования рациональной конструкции и режимов работы установки, обеспечивающих стабилизацию температурных условий процесса затвердевания жидкого металла и дальнейшего его прессования [9].

Отечественный и зарубежный опыты реализации технологии непрерывного литья—прессования металлов [6, 9] показали, что обеспечение надежной и длительной эксплуатации установок в существенной мере зависит от правильного выбора тепловых режимов их работы. Как отмечено в работах [10, 11], это связано с тем, что температура металла и скорость при прессовании являются главными факторами рациональной технологии ведения процесса прессования. Результаты работ [12–15] показывают, что управление формированием качественной структуры при деформации кристаллизующегося металла зависит главным образом от правильной организации теплообменных процессов, теория которых применительно к конкретным модификациям устройств непрерывного прессования еще недостаточно изучена. Наиболее перспективным в этом направлении следу-

ет считать использование современного аппарата математического моделирования. Так, математическому моделированию непрерывных процессов литья и последующего прессования цветных и черных металлов посвящен ряд работ, направленных на изучение вопросов оптимизации работы установок и управления их режимными параметрами [16–19].

При решении задачи многофакторного исследования нового технического объекта требуется использование различных приближений и численных методов, позволяющих предсказать его поведение без проведения, как правило, дорогого и затруднительного эксперимента. В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники и созданием современных программных продуктов стало возможным широкое применение такого вида теоретического исследования, как компьютерное моделирование [20, 21].

Исследования на опытно-промышленной установке с горизонтальным кристаллизатором и ее математической модели показали, что начальный период ее работы после пуска характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов и значительным их нагревом. При выходе же на стационарный тепловой режим существенное влияние на динамику затвердевания металла могут оказывать ряд внешних факторов: флуктуация начальной температуры поступающего расплава и элементов установки, скорость вращения кристаллизатора и ряд других [22].

Цель настоящей работы заключалась в проведении теоретических исследований влияния перегрева заливаемого алюминиевого расплава на процессы нестационарного теплообмена в установке непрерывного совмещенного литья–прессования с горизонтальным кристаллизатором.

Методика исследований

Численное исследование процесса непрерывного совмещенного литья–прессования опытного эвтектического алюминиевого сплава АК12 проведено на разработанной ранее трехмерной компьютерной модели теплообмена в опытной полупромышленной установке с горизонтальным кристаллизатором (рис. 1), реализованной на базе программных комплексов SolidWorks (2017) и Ansys CFX 17.1 [8].

В ходе работы установки жидкий металл 3 заливается через дозатор 4 в кольцевую канавку 2 вра-

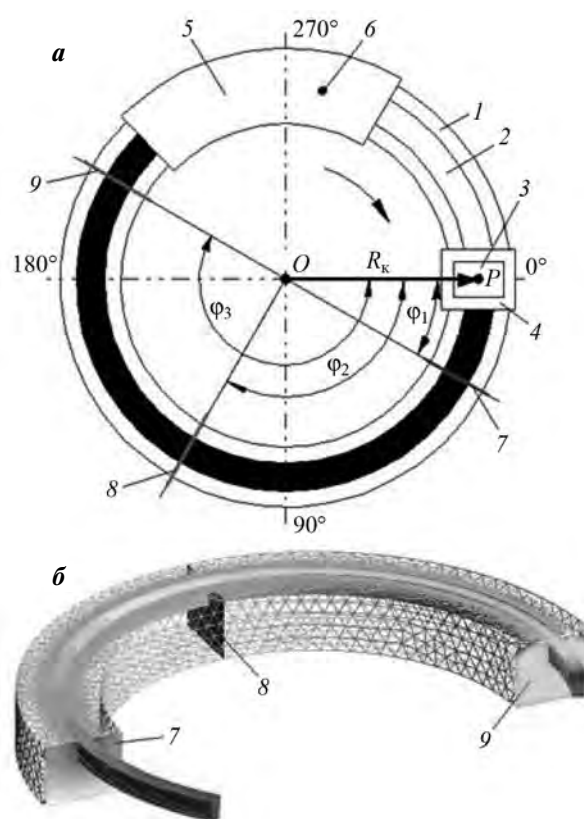


Рис. 1. Схема установки непрерывного процесса совмещенного литья–прессования с горизонтальным карусельным кристаллизатором
1 – колесо-кристаллизатор; 2 – кольцевая канавка радиусом R_k ; 3 – жидкий металл; 4 – дозатор; 5 – дугообразный сегмент; 6 – матрица; φ_1 , φ_2 и φ_3 – центральные углы дуги между точкой заливки расплава P и расчетными сечениями 7, 8 и 9

щающегося колеса-кристаллизатора 1 и затвердевает до входа в неподвижную камеру прессования, образованную на участке сопряжения канавки с дугообразным сегментом 5. Затвердевший металл, поступая в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы 6 в виде пресс-изделия. Процессы заливки жидкого металла в канавку, его затвердевание и прессование протекают непрерывно.

В математической модели расплав заливался в кристаллизатор через дозатор с диаметром выходного сечения 1,8 мм, установленный на зафиксированной относительно корпуса подставке. Массовый расход расплава составлял 9 г/с при температуре его заливки, изменяющейся в интервале $t_p = 635 \div 750$ °C. Таким образом, диапазон перегрева расплава над температурой плавления эвтектического сплава АК12 ($t_{пл} = 580$ °C) составил $\Delta t_p = 55 \div 170$ °C. Выход расплава в модели соответство-

вал его расходу, направление вращения кристаллизатора принималось по часовой стрелке, температура окружающей среды 20°C.

Нелинейные трехмерные дифференциальные уравнения сохранения энергии для обрабатываемого металла и элементов установки записывались в виде субстанциональной производной и включали члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение в процессе литья—прессования сплава [8]:

$$\frac{\rho_i c_i(t)(Dt_i)}{d\tau} = \rho_i c_i(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} + \rho_i c_i(t) w_i (\nabla t_i) = \nabla [\lambda_i(t)(\nabla t_i)] + q_i^{\text{BH}}, \quad (1)$$

где $t_i = t_i(x, y, z, \tau)$ — поле температур в i -м элементе; ρ_i , c_i и λ_i — плотность, объемная теплоемкость и теплопроводность i -го элемента; w_i — скорость движения i -го элемента; $q_i^{\text{BH}}(x, y, z, \tau)$ — внутреннее тепловыделение в i -м элементе.

Уравнение (1) дополнялось краевыми условиями [20]:

$$t_i = t_i(x, y, z, \tau = 0) = t_{0i}(x, y, z),$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \pm q_i, \quad (2)$$

где q_i — условия радиационно-конвективного теплообмена на границе поверхности Γ i -го элемента установки ($q_i > 0$ — тепловой поток направлен внутрь элемента).

Так как расплав проходит зоны кристаллизации и прессования, то величина q_i^{BH} в уравнении (1) записывалась в виде

$$q_i^{\text{BH}} = S_h' + S_h'', \quad (3)$$

где S_h' — внутреннее тепловыделение при фазовом переходе; S_h'' — тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла [7, 9, 17].

В модели теплота затвердевания расплава отдельно не учитывалась, а включалась в величину эффективной теплоемкости, которая является разрывной энергетической характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в зоне кристаллизации от доли образующейся твердой фазы. В расчетах использовалась упрощенная геометрия модели: фаски на кристаллизаторе и металле не учитывались (при условии сохранения площади поперечного сечения слитка); отсутствовали также крепежные соединения.

Для оценки адекватности модели использованы результаты лабораторных испытаний непрерывного совмещенного литья—прессования алюминиевого сплава АК12 [8, 22]. Анализ показал, что наиболее адекватно эксперименту отвечает характер полученной расчетной зависимости угла затвердевания в кристаллизаторе внешней поверхности расплава $\varphi_s^{\text{пов}}$ в период переходного теплового режима $\tau_{\text{пр}}$. Для заданных условий максимальная погрешность моделирования функции $\varphi_s^{\text{пов}} = f(\tau_{\text{пр}})$ составила 5,3 %.

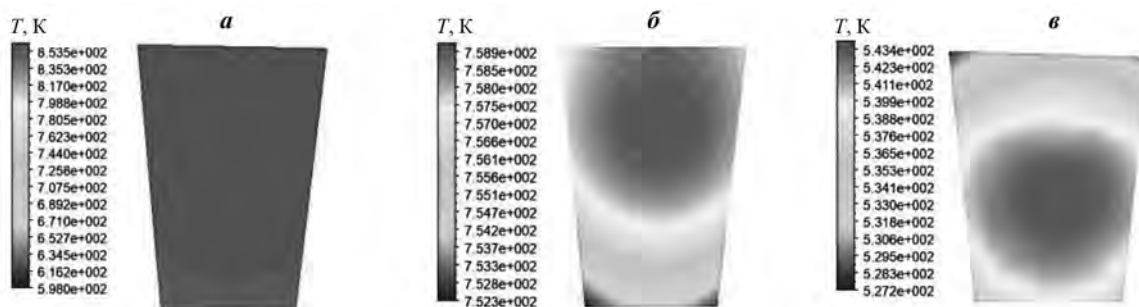
Сравнительный анализ динамики теплообмена в переходном режиме работы установки проведен в трех расчетных сечениях затвердевающего металла и кристаллизатора, образованных вертикальной секущей плоскостью и расположенных на удалении от точки заливки расплава P под углами $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 120^\circ$ и $\varphi_3 = 210^\circ$ (см. рис. 1). Как видно, центральные углы φ_i дуги окружности канавки кристаллизатора радиусом $R_k = 0,35$ м расположены между полярной осью OP (отрезок $OP = R_k$) и лучами, соединяющими полюс O с расчетными сечениями. Отсчет φ_i принят в направлении по часовой стрелке, а сечение φ_3 , расположенное на угловом расстоянии $\Delta\varphi = 15^\circ$ от неподвижного дугообразного сегмента, рассматривается как контрольное. На этом дуговом отрезке от точки P (0,41π, м) в соответствии с технологическими условиями горячего прессования должен быть обеспечен оптимальный диапазон максимальной температуры по сечению затвердевающего алюминиевого расплава ($t_{3,p}^{\text{max}}$), значение которого на 3–5 °C ниже $t_{\text{пл}}$. Это позволяет получить на выходе из матрицы пресс-изделие с температурой $t_{3,p}^{\text{max}} \leq 0,9t_{\text{пл}}$.

Результаты исследования и их обсуждение

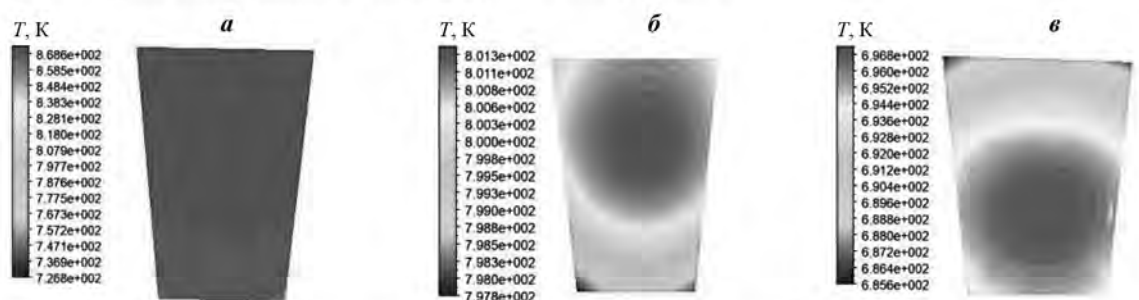
Установлено существенное влияние на характер затвердевания расплава постепенного разогрева кристаллизатора в период переходного теплового режима. Так, независимо от принятой в расчетах величины t_p , в начальный момент после заливки расплава температурное поле в сечении φ_1 носит симметричный характер, а минимальная температура t_p^{min} превышает величину $t_{\text{пл}}$. По мере разогрева кристаллизатора в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля по сечению металла со сдвигом области с максимальной температурой t_p^{max} к его поверхности.

ным слоям, что наиболее заметно проявляется вблизи камеры прессования (рис. 2). Как видно, в расчетных сечениях φ_2 и φ_3 на всем протяжении $\tau_{пр}$

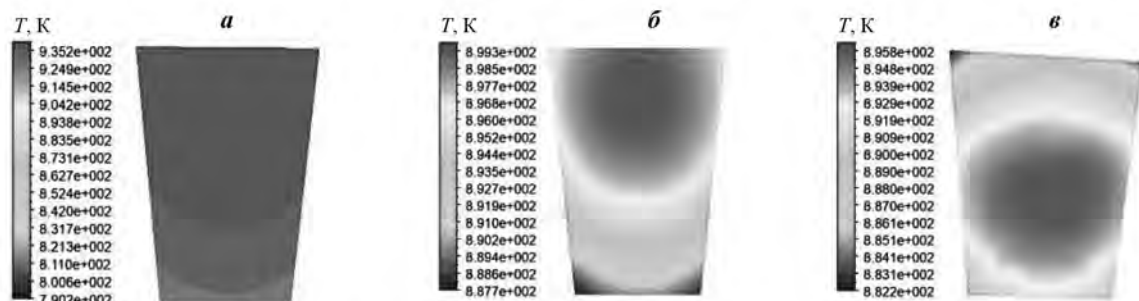
имеет место сдвиг $t_p^{\min}$: в сечении φ_2 — в сторону поверхностного слоя, контактирующего с окружающей средой; в контрольном сечении φ_3 — в сторо-



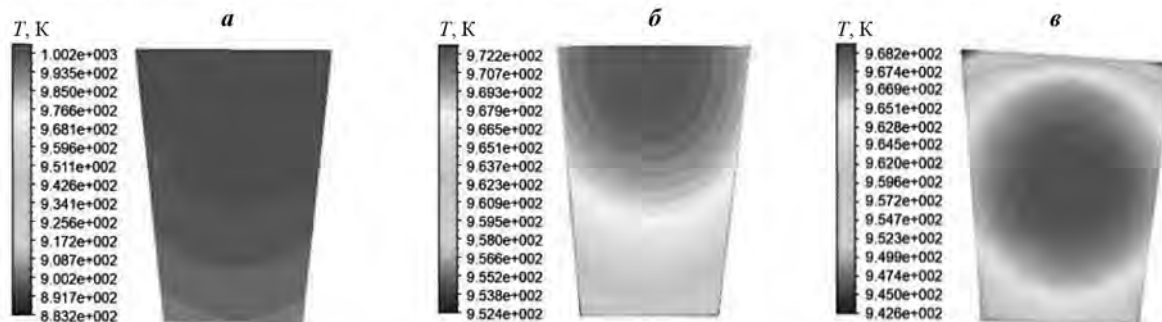
Время переходного теплового процесса $\tau_{пр} = 10$ мин; $t_p = 635$ °C



Время выхода на стационарный тепловой режим $\tau_{ст} = 21$ мин; $t_p = 635$ °C



Время переходного теплового процесса $\tau_{пр} = 10$ мин; $t_p = 750$ °C



Время выхода на стационарный тепловой режим $\tau_{ст} = 31$ мин; $t_p = 750$ °C

Рис. 2. Температурное поле в расчетных сечениях металла φ_i при различных значениях температуры расплава
 $a - \varphi_1 = 30^\circ$; $б - \varphi_2 = 120^\circ$; $в - \varphi_3 = 210^\circ$

ну поверхностного слоя, контактирующего с телом кристаллизатора. В последнем случае имеет место интенсивный теплообмен между затвердевающим расплавом и телом кристаллизатора. При достижении стационарного теплового состояния установки ($\tau_{ст}$) наблюдается некоторое выравнивание температурного поля в результате сдвига t_p^{max} к центру сечения металла.

Расчеты свидетельствуют о высокой продолжительности переходного процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею стационарного теплового режима ($\tau_{ст}$), на величину которой заметное влияние оказывает температура заливаемого расплава. Так, из приведенных на рис. 3 графиков следует, что при увеличении t_p от 635 до 750 °С время выхода установки на режим, близкий к изотермическим условиям затвердевания расплава, возрастает от 22 до 32 мин (на 10 мин), т.е. прирост величины $\Delta\tau_{ст}$ составляет в

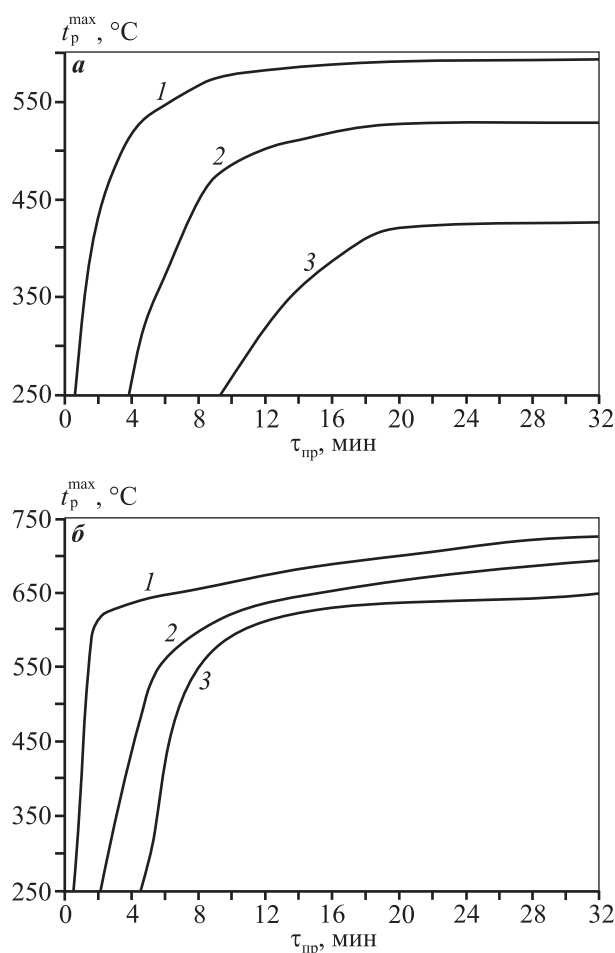


Рис. 3. Изменение максимальной температуры t_p^{max} сплава АК12 в расчетных сечениях ϕ_i

а — $t_p = 635$ °С, $\Delta t_p = 55$ °С; **б** — $t_p = 750$ °С, $\Delta t_p = 170$ °С
1 — $\phi_1 = 30^\circ$, **2** — $\phi_2 = 120^\circ$, **3** — $\phi_3 = 210^\circ$

среднем 1 мин на каждые 10 °С перегрева заливаемого расплава.

Согласно расчетам при $t_p = 635$ °С ($\Delta t_p = 55$ °С) на всем протяжении переходного теплового процесса обрабатываемый сплав попадает под камеру прессования с температурой, не превышающей величину $t_{пл}$ во всех расчетных сечениях (см. рис. 2 и 3).

Установлен максимальный температурный предел перегрева заливаемого металла $t_p^{max} = 675$ °С, выше которого при реализации технологии непрерывного совмещенного литья—прессования алюминиевый расплав не затвердевает в кристаллизаторе, и требуется организация принудительного охлаждения элементов установки. В частности, перегрев заливаемого алюминиевого сплава АК12 над температурой его плавления Δt_p^{max} не должен превышать 95 °С.

При значениях $t_p > 675$ °С на всем протяжении переходного процесса величина t_p^{max} затвердевающего расплава в расчетных сечениях превышает $t_{пл}$, и металл попадает в зону прессования в жидкой фазе, что недопустимо по технологическим условиям его обработки. Так, например, при $t_p = 750$ °С по истечении $\tau_{пр} = 9$ мин работы установки (18 оборотов кристаллизатора) t_p^{max} расплава в контрольном сечении ϕ_3 превышает $t_{пл}$.

Сравнительный анализ показал, что перегрев алюминиевого расплава в температурном диапазоне от 635 до 675 °С (на 40 °С) приводит к соответствующему возрастанию времени переходного теплового процесса на 2 мин, а длины дуги затвердевания металла — на 1,04 м.

Анализ динамики затвердевания расплава АК12 показал, что важную роль в процессах теплообмена играет текущая температура колеса-кристаллизатора: чем она ниже, тем быстрее происходит затвердевание расплава, а следовательно, увеличивается производительность установки. Поэтому при исследовании нестационарного теплообмена была проведена оценка динамики изменения температуры в теле кристаллизатора в переходном тепловом режиме при различных значениях t_p и ϕ_i (см. рис. 1). Результаты расчета показали, что распределение температур по ширине тела кристаллизатора имеет характерный максимум в области расположения канавки с расплавом. При этом в процессе прогрева кристаллизатора перепад температур по его ширине постепенно снижается.

Конструкция установки предусматривает наличие воздушной прослойки между относитель-

но холодным корпусом и разогретым кристаллизатором. Теплообмен между этими элементами происходит через подшипники, температура которых может превысить их предельно допустимое рабочее значение $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, что снизит эксплуатационную надежность установки в целом. В связи с этим был проведен анализ влияния теплового состояния нижней горизонтальной (внутренней) поверхности кристаллизатора на температурные условия работы подшипников в переходном тепловом режиме при различных значениях t_p .

Расчеты показали, что максимальная температура внутренней поверхности кристаллизатора находится в области, расположенной под канавкой с расплавом, и в течение всего переходного периода продолжает расти. На рис. 4 представлено изменение этой температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора в зависимости от $\tau_{пр}$ при перегреве расплава АК12 $\Delta t_p = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как видно, на 5-й минуте переходного процесса (10 оборотов кристаллизатора) максимальная температура внутренней поверхности кристаллизатора в области заливки расплава достигает $480\text{ }^{\circ}\text{C}$, а подшипников — $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При $\Delta t_p = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ в этом промежутке времени указанные температуры имеют соответственно значения 582 и $82\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определено, что при выходе установки на стационарный тепловой режим ($\tau_{ст}$) температура подшипников при $\Delta t_p = 55$ и $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает со-

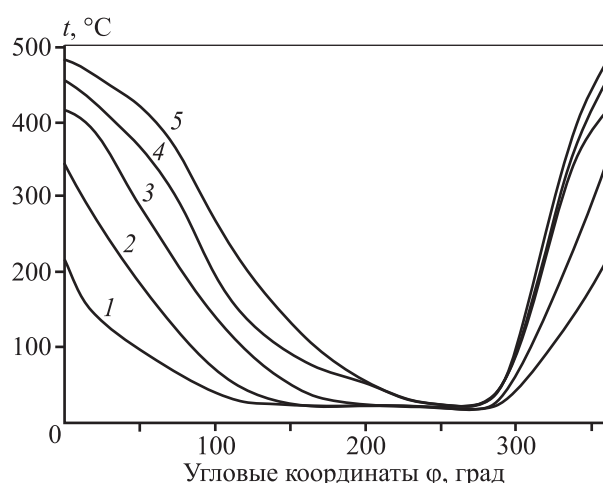


Рис. 4. Изменение максимальной температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора при $t_p = 635\text{ }^{\circ}\text{C}$

Цифры у кривых — время от начала переходного процесса $\tau_{пр} = 1, 2, 3, 4$ и 5 мин

ответственно 164 и $204\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому при высоком перегреве расплава требуется проведение дополнительных конструктивных мероприятий для их тепловой защиты: установка теплоизоляции или организация отбора излишней теплоты в области контакта подшипников с внутренней поверхностью кристаллизатора. Так, согласно расчетам наличие теплоизоляционной вставки под внутренней поверхностью кристаллизатора позволяет при $\Delta t_p = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшить температуру подшипников в момент выхода установки на стационарный тепловой режим до $176\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы

1. Установлено, что в переходном тепловом режиме возрастает несимметричность температурного поля затвердевающего алюминиевого сплава АК12, которое в контрольном сечении вблизи камеры прессования характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к контактирующей поверхности кристаллизатора.

2. Выявлено, что распределение температур по ширине тела карусельного горизонтального кристаллизатора имеет характерный максимум в области расположения канавки с расплавом. По мере прогрева кристаллизатора перепад температур по его ширине постепенно снижается.

3. Получены количественные зависимости продолжительности переходного теплового процесса от температуры заливаемого расплава. Так, увеличение температуры перегрева расплава от 635 до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к возрастанию на 10 мин времени выхода установки на стационарный тепловой режим.

4. Определен максимальный температурный предел перегрева заливаемого металла, равный $675\text{ }^{\circ}\text{C}$, выше которого при реализации технологии непрерывного совмещенного литья—прессования в установке данной конструкции алюминиевый расплав не затвердевает в кристаллизаторе, попадает под камеру прессования в жидкой фазе, что требует организации принудительного охлаждения кристаллизатора.

5. Показано, что установка теплоизоляционной вставки под внутренней поверхностью разогретого кристаллизатора позволяет при высоком перегреве заливаемого расплава обеспечить в период переходного теплового процесса значение рабочей температуры подшипников, не превышающее предельно допустимый уровень $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Литература/References

1. Goodes I.M. Continuous extrusion by the Conform process. *Wire Ind.* 1975. Vol. 501. P. 677—678.
2. Авдулов А.А., Сергеев Н.В., Гудков И.С., Тимофеев В.Н., Горохов Ю.В., Авдулова Ю.С. Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного процесса прессования способом Конформ. *Журн. СФУ. Сер. Техника и технологии.* 2017. Vol. 10. No. 1. С. 85—94.
Avdulov A.A., Sergeev N.V., Gudkov I.S., Timofeev V.N., Gorokhov Yu.V., Avdulova Yu.S. Wire production development of special aluminum alloys based on electromagnetic mold casting method and continuous extrusion process known as Conform. *Zhurnal SibFU. Ser. Tekhnika i tekhnologii.* 2017. Vol. 10. No. 1. P. 85—94 (In Russ.).
3. Yun X.-B., Yao M.-L., Wu Y., Song B.-Y. Numerical simulation of continuous extrusion extending forming under the large expansion ratio for copper strip. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 80–81. P. 91—95.
4. Raab G.I., Raab A.G., Shibakov V.G. Analysis of shear deformation scheme efficiency in plastic structure formation processes. *Metallurgiya.* 2015. Vol. 54. No. 2. P. 423—425.
5. Zhou T.G., Jiang Z.Y., Wen J.L., Li H., Tieu A.K. Semi-solid continuous casting—extrusion of AA6201 feed rods. *Mater. Sci. Eng.* 2012. Vol. 8. P. 108—114.
6. Mitka M., Gawlik M., Bigaj M., Szymanski W. Continuous rotary extrusion (CRE) of flat sections from 6063 alloy. *Key Eng. Mater.* 2015. Vol. 641. P. 183—189.
7. Скуратов А.П., Потапенко А.С., Горохов Ю.В. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме. *Журн. СФУ. Сер. Техника и технологии.* 2017. Т. 10. No. 3. С. 337—345.
Skuratov A.P., Potapenko A.S., Gorokhov Yu.V. The research of thermal operations in the equipment of continual casting and aluminum extrusion in transitional mode. *Zhurnal SibFU. Ser. Tekhnika i tekhnologii.* 2017. Vol. 10. No. 3. P. 337—345 (In Russ.).
8. Скуратов А.П., Потапенко А.С. Компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов. *Журн. СФУ. Сер. Техника и технологии.* 2017. Т. 10. No. 8. С. 1019—1030.
Skuratov A.P., Potapenko A.S. Computer model heat exchange of the continuous casting and extrusion non-ferrous metals. *Zhurnal SibFU. Ser. Tekhnika i tekhnologii.* 2017. Vol. 10. No. 8. P. 1019—1030 (In Russ.).
9. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Исследование теплового режима кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла при изготовлении металлоизделий из алюминиевых сплавов. *Кузн.-штамп. пр-во. Обработка материалов давлением.* 2011. No. 10. С. 39—45.
Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Investigation of thermal regime of crystallizer in the installation of horizontal casting and deformation of metals. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem.* 2011. No. 10. P. 39—45 (In Russ.).
10. Лехов О.С., Лусин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2015. No. 6. С. 30—35.
Lekhov O.S., Lusin I.V. An installation for the combined continuous casting and deformation for the production of bimetallic strips. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2015. No. 6. P. 30—35 (In Russ.).
11. Фомина Е.Е., Жиганов Н.К. Моделирование и исследование процесса затвердевания заготовок при дискретно-непрерывном литье металлов. *Компьютерные исследования и моделирование.* 2009. Т.1. No. 1. С. 67—75.
Fomina E.E., Zhiganov N.K. Computer modeling and visualization of discrete-continuous casting of nonferrous metal and alloys. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie.* 2009. Vol.1. No. 1. P. 67—75 (In Russ.).
12. Popescu I.N., Bratu V., Rosso M., Popescu C., Stoian E.V. Designing and continuous extrusion forming of Al—Mg—Si contact lines for electric railway. *J. Optoelectr. Adv. Mater.* 2013 Vol. 15. P. 712—717.
13. Zhao Y., Song B.-Y., Yun X.-B., Pei J.-Y., Jia C.-B., Yan Z.-Y. Effect of process parameters on sheath forming of continuous extrusion sheathing of aluminum. *Trans. Non-ferr. Met. Soc. China* (Eng. ed.). 2012. Vol. 22 (12). P. 3073—3080.
14. Krol M., Tanski T., Snopinski P., Tomiczek B. Structure and properties of aluminium — magnesium casting alloys after heat treatment. *J. Therm. Anal. Calorimetr.* 2017. Vol. 127. No. 1. P. 299—308.
15. Wan Y.C., Xiao H.C., Jiang S.N., Tang B., Liu C.M., Chen Z.Y., Lu L.W. Microstructure and mechanical properties of semi — continuous cast Mg—Gd—Y—Zr alloy. *Mater. Sci. Eng.* 2014. Vol. 617. No. 1. P. 243—248.
16. Будилов И.Н., Лукашук Ю.В., Лукашук С.Ю. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья. *Вестн. УГАТУ.* 2011. Т. 15. No 1 (41). С. 87—94.
Budilov I.N., Lukashchuk Yu.V., Lukashchuk S.Yu. Simulation of aluminum's formation in the process of

- semi-continuous casting. *Vestnik UGATU*. 2011. Vol. 15. No. 1 (41). P. 87—94 (In Russ.).
17. Черномас В.В., Химухин С.Н., Саликов С.Р., Коновалов А.В. Моделирование процесса деформации при получении алюминиевой полосы совмещенным методом литья и деформации металла. *Технология. Обработка металлов*. 2012. No. 3(56). С. 5—11.
Chernomas V.V., Himuhin S.N., Salikov S.R., Konovarov A.V. Modeling of the deformation process in obtaining an aluminum strip casting method and the combined deformation of the metal. *Tekhnologiya. Obrabotka metallov*. 2012. No. 3(56). P. 5—11 (In Russ.).
18. Liu J., Liu C. Optimization of mold inverse oscillation control parameters in continuous casting process. *Mater. Manuf. Process*. 2015. Vol. 30. No. 4. P. 563—568.
19. Космацкий Я.И., Фокин Н.В. Математическое моделирование совмещенного процесса разливки и бокового прессования. *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Metallurgiya*. 2015. Т. 15. No. 1. С. 29—33.
Kosmackij Ya.I., Fokin N.V. Mathematical modeling of the combined process of casting and lateral pressing. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 29—33 (In Russ.).
20. Assungao C., Parreiras R., Oliveira G. Water distribution assessment applied to mathematical model of continuous casting of steel. *Aistech-Iron and Steel Technology Conf. Proc.* 2014. P. 2895—2905.
21. Kaschnitz E., Romansky M., Mergen R. Numerical simulation of temperature distribution in a continuous casting process for the production of AlSn(Cu) alloys. *High Temperatures — High Pressures*. 2002. Vol. 34. P. 699—704.
22. Потапенко А.С., Скуратов А.П., Горохов Ю.В. Динамика затвердевания алюминиевого сплава при нестационарном тепловом режиме установки непрерывного литья и прессования. *Вестн. ИрГТУ*. 2017. Т. 21. No. 7. С. 109—118.
Potapenko A.S., Skuratov A.P., Gorokhov Yu.V. The dynamics of aluminum alloy solidification under nonstandard heat mode of a continual casting and pressing equipment. *Vestnik IrGTU*. 2017. Vol. 21. No. 7. P. 109—118 (In Russ.).